(주)테크다스
www.techdas.co.kr

디지털 트윈: 플랜트 실시간 운전 최적화

김아름, 이종현

1. 서론

디지털 트윈(Digital Twin)은 글로벌 기업 GE가 주창한 개념으로, 물리적 세계(현실)의 기계나 장비, 사물 등을 가상세계에 동일하게 구현하여 사물의 상태, 생산성, 동작 등을 미리 검증하는 기술이다. 디지털 트윈은 2000년대 들어 제조업에 도입되기 시작했으며 항공, 건설, 의료, 에너지, 국방, 도시설계 등 다양한 분야로 적용 범위가 확대되고 있다.

디지털 트윈 기술을 활용하면 가상세계에서 장비, 시스템 등의 상태를 모니터링하고 유지·보수 시점을 파악해 개선할 수 있다. 가동 중 발생할 수 있는 다양한 상황을 예측해 안전을 검증하거나 돌발 사고를 예방해 사고 위험을 줄일 수도 있다. 또한 생산성 향상, 장비 최적화 등의 결과를 가져올 수 있고 시제품 제작에 들어가는 비용과 시간을 대폭 절감할 수 있다.

이러한 측면에서 주로 정유공장, 화학공장, 발전소, 제철소 등의 장치산업에 적용되고 있는 실시간 운전 최적화(RTO, Real-time Optimization) 기술이 디지털 트윈의 유망한 적용 분야로 주목받고 있다. 본 고에서는 산업 플랜트의 RTO 구축 플랫폼인 PTOP-Opt™를 사례 중심으로 소개하고자 한다.

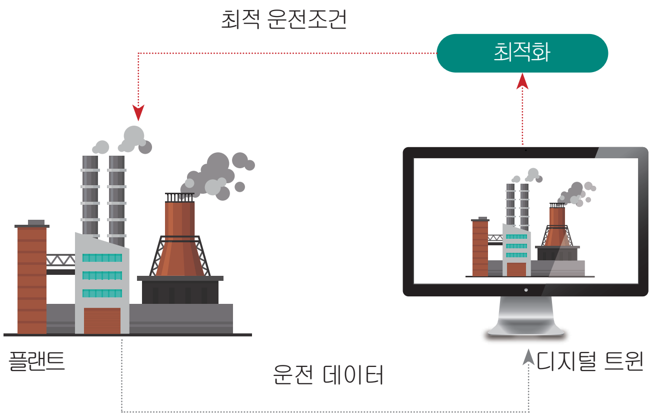

그림 1. 디지털 트윈을 이용한 실시간 최적화

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

2. PTOP-Opt™ 소개

RTO는 데이터의 생성, 취합, 분석, 최적화 실행 순서로 진행된다. 실제 플랜트와 디지털 트윈을 동기화시키고, 디지털트윈으로 시뮬레이션을 실시하여 품질 향상이나, 생산량 증대 또는 에너지 절감을 달성하는 운전조건을 찾는다. RTO 구축 플랫폼인 PTOP--Opt™는 아래와 같이 4 단계로 진행된다.

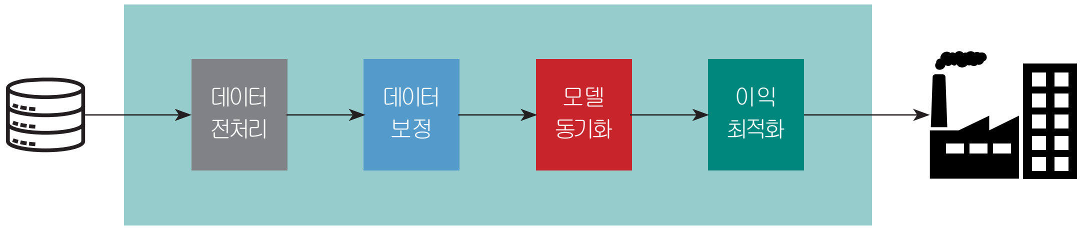

그림 2. PTOP-Opt™실행 절차

(1) 데이터 전처리(Data Preprocessing)

플랜트로부터 수집한 원시 데이터는 센서 고장이나 신호 노이즈 등에 의한 오차를 포함하고 있다. 정확한 RTO 결과를 위해서는 측정값 오차를 가능한 줄여야 하므로, 특별하게 고안한 필터링 기법을 적용하여 오차를 소거한다.

(2) 데이터 보정(Data Reconciliation; DR)

RTO에서는 물질 수지와 열 수지가 기본적으로 만족되어야 하는데, 이를 위해서 데이터 보정(DR)을 실시한다. DR은 측정 오차의 통계적 특성과 센서 중복성을 이용하여 데이터를 보정하는 기술로 정유공장이나 석유화학공장, 발전소, 유틸리티 플랜트 등에서는 오래 전부터 적용되던 기술이다.[1]

(3) 동기화(Model Synchronization)

노이즈와 측정 오차가 제거되고, 물질 수지와 열 수지가 성립되면, 역공학(Reverse Engineering)을 실시하여 디지털 트윈을 실제 플랜트와 동기화시킨다. 생산 제품의 품질이나 연료 사용량을 정확히 예측하도록 디지털 트윈의 모델 파라미터를 튜닝한다. RTO의 기술력 차이는 디지털 트윈의 정확성에 달려 있다.

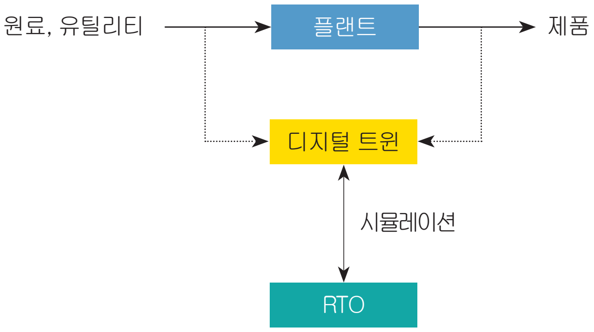

그림 3. 디지털 트윈을 이용한 RTO 어플리케이션

(4) 이익 최대화(Profit Optimization)

마지막 단계는 디지털 트윈으로 시뮬레이션을 실시하여 이익을 최대로 하는 운전조건을 찾는 과정이다. 최적화의 목적함수는 플랜트의 생산 이익이며, 이를 수학적으로 표현하면 다음 식과 같이 제품의 총 생산 비용에서 원료와 유틸리티의 비용을 뺀 값이다.

[1] VDI-2048, Germany Standardization Organization

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

Φ = 제품 양 x 제품 가격 – (원료 양 x 원료 가격 + 유틸리티 양 x 유틸리티 가격)

기존의 RTO 솔루션은 운전 설정치(Set Point)만을 최적화할 수 있다. 반면에 PTOP-Opt™는 이보다 한단계 더 나아가 설비의 가동여부까지 최적화할 수 있다. 즉, 원료나 제품의 재고 상태를 포함해 조업 스케줄을 결정할 수 있고, 펌프, 보일러, 압축기, 냉동기의 가동여부를 포함하여 운전 설정치를 최적화할 수 있다. PTOP-Opt™는 기존 RTO보다 다양한 유형의 최적화 문제를 다룰 수 있다.

표 1. 최적화 기법 구분

최적화 기법	최적화 유형	기존 솔루션	PTOP-Opt
비선형계획법	운전 설정치 최적화	O	O
혼합정수선형계획법	조업 스케줄링	X	O
혼합정수비선형계획법	설비 On/Off 포함 설정치 최적화	X	O

3. PTOP-Opt™ 적용사례

(1) 스팀 보일러

보일러나 가열로와 같은 연소설비에서 연료를 절감하고 환경오염물질의 배출을 줄이기 위해서는 무엇보다 연소효율을 향상시키는 것이 중요하다. 연소효율을 높이기 위해서는 적정량의 연소용 공기 주입이 필요하다. 연소용 공기를 과다 주입하면 배기가스가 많이 발생하여 효율이 저하되고, 너무 적게 주입해도 불완전 연소로 인해 오히려 효율이 저하된다.[2] 따라서 적정량의 연소용 공기를 주입하여야 한다.

보일러 운전자는 경험적 지식을 바탕으로 연소용 공기 주입량을 결정한다. 그러나 가동 부하, 대기 온·습도, 연료 성분, 버너 상태, 배기가스의 온도 변화 등 다양한 운전 변수들이 복잡하게 얽혀 있기 때문에 경험적 지식만으로는 한계가 있다. 디지털 트윈을 이용하면 이러한 변수들 간의 관계를 체계적으로 분석하여 최적의 연소용 공기 주입량을 결정할 수 있다.

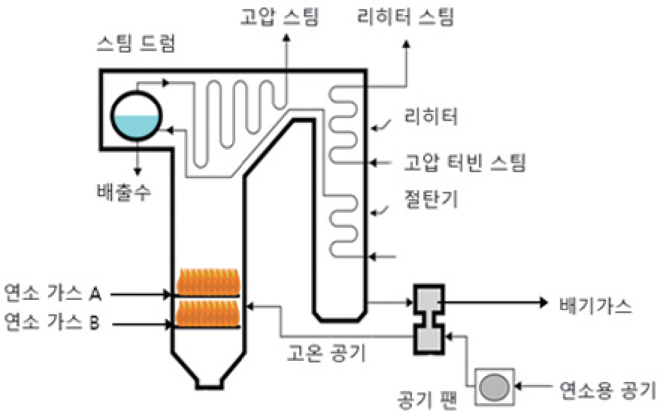

그림 4. 스팀 보일러 구성도

시간당 250톤의 스팀을 생산하는 보일러에 PTOP-Opt™를 적용하였다. PTOP-Opt™ 최적화 전과 후의 결과를 그림 5에 비교하였다. 최적화 적용 전에는 배기가스의 일산화탄소(CO) 함량이 1,000ppm이상으로 높게 운전되어 불완전 연소가 발생하였으나, 적용 후에는 CO가 거의 연소되어 30ppm이하를 유지하였다. 이 때 배기가스의 산소(O2) 농도가 1.5%까지 상승하였다. 결과적으로 PTOP-Opt™ 이전 대비 연소효율은 0.7% 증가하였고, 연간으로 환산하면 5억원의 수익에 해당한다.

[2] 연소설비 가상센서 계측 및 운전효율 최적화, 고성근, 월간제어계측, 2020

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

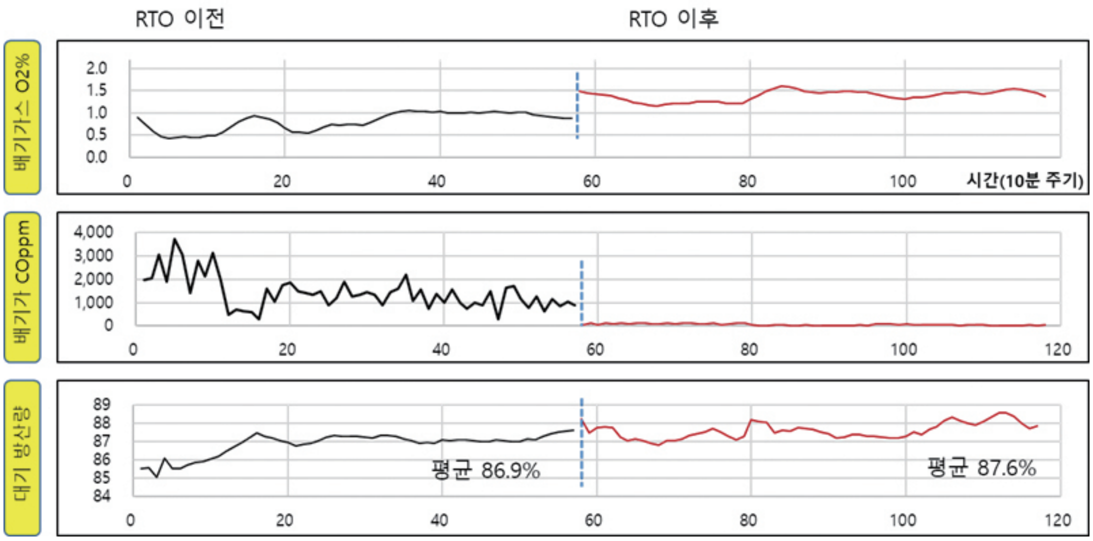

그림 5. 보일러의 RTO 적용 전과 후 운전 비교

(2) 공기압축기 시스템

반도체나 디스플레이 제조공장은 압축공기를 동력원으로 사용한다. 다수의 압축기에서 압축공기를 생산해 헤더를 통해 각 사용처로 공급한다. 압축공기 수요량은 공장의 조업 상황에 따라 가변적인데, 급작스러운 수요 증가에도 공급량이 부족하지 않도록 여유 있게 압축공기를 생산해야 한다. 그러나 여유량을 너무 크게 유지하면 부하율이 낮아 전력 사용량이 증가하므로 적정량을 유지하는 것이 중요하다.

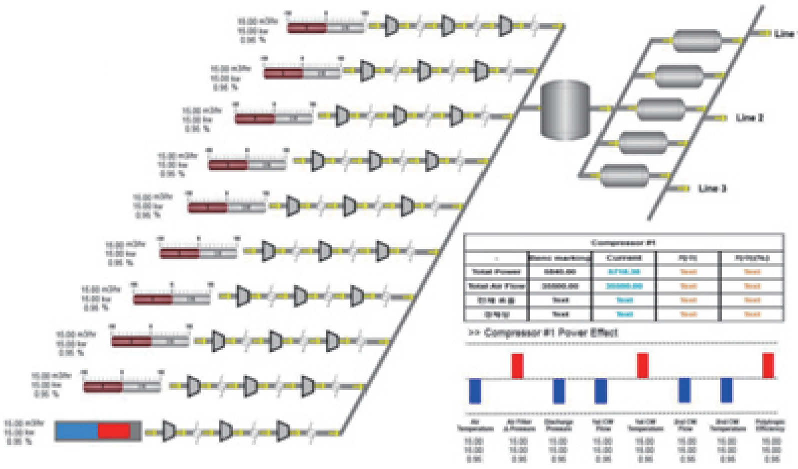

그림 6. 공기압축기 시스템 구성도

압축기의 압력 설정 방법은 1) 네트워크 제어, 2) 케스케이드 제어, 3) 부하배분 방식이 있다. 세 방식중에서 가장 에너지 효율이 높은 것이 부하배분 방식이다. PTOP-Opt™을 이용하여 부하배분을 최적화한다. PTOP-Opt™를 10기의 병렬 압축기에 대해 적용하였다. PTOP-Opt™로 각 공기압축기의 효율 정보를 생성하고, 이를 기반으로 공기압축기의 가동조합과 부하배분을 결정하였다. 또한 제조공장의 압축공기 수요량을 항상 만족하면서 전기 사용량을 최소로 하도록 각 압축기의 압력을 결정하였다.

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

최적화 전의 조업 상황은 10기의 압축기를 모두 가동하고, 이중 5기를 부분부하로 운전하였는데, PTOP-Opt™는 압축기 2기를 가동 정지시키고, 단 1기만을 부분부하로 운전하도록 결정하였다. 새로운 안에 따라 공장에서 필요로 하는 압축공기를 차질 없이 공급하면서 가동 기수를 줄여서 전기 사용량을 5% 절감하였다.

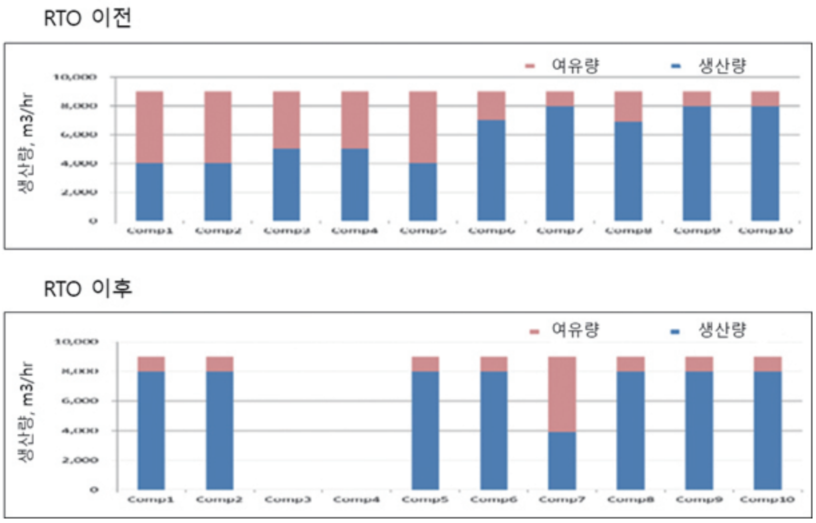

그림 7. 공기압축기 시스템에 대한 RTO 적용 전과 후 운전 비교

(3) 부생가스 스케줄링

제철소에서는 자체적으로 사용하고 남는 부생가스를 발전 플랜트에 공급해 전기를 생산한다. 제철소 조업에 따라 부생가스 유량이 변하기 때문에 발전 플랜트는 부하 조절이 용이하여야 한다. 운전 관점에서는 가스를 보관하는 홀더의 레벨을 30~70%로 일정하게 유지하여 조업 안전성을 확보하고, 버너와 발전 플랜트의 On/Off를 줄여 운전자의 편의성을 높이고, 플랜트의 부하배분과 최적의 가동조합을 결정하여 경제성을 향상하는 것이 중요하다. 특히 홀더 레벨이 완전히 낮아져서 가스를 승압하는 압축기의 케비테이션(Cavitation)이 발생하지 않도록 하는 것이 안전상 필수적이다.

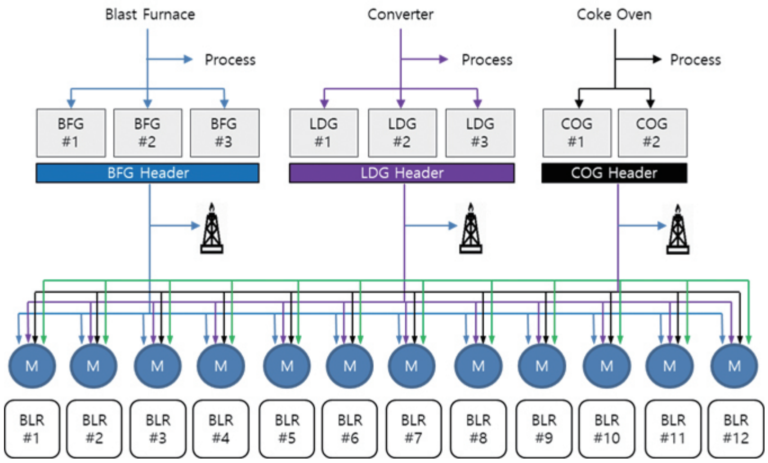

그림 8. 부생가스 시스템 구성도

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

3 종류의 부생가스를 12기의 발전 플랜트에 배분하는 문제에 PTOP-Opt™를 적용하였다. 최적화 결과는 아래 그림과 같다. RTO 적용 전에 비해 홀더 레벨이 안정화되었으며, 버너 스위치 횟수도 줄었다. 또한 대기 방산량도 획기적으로 감소하였으며, 발전이 1% 정도 증가하였다.

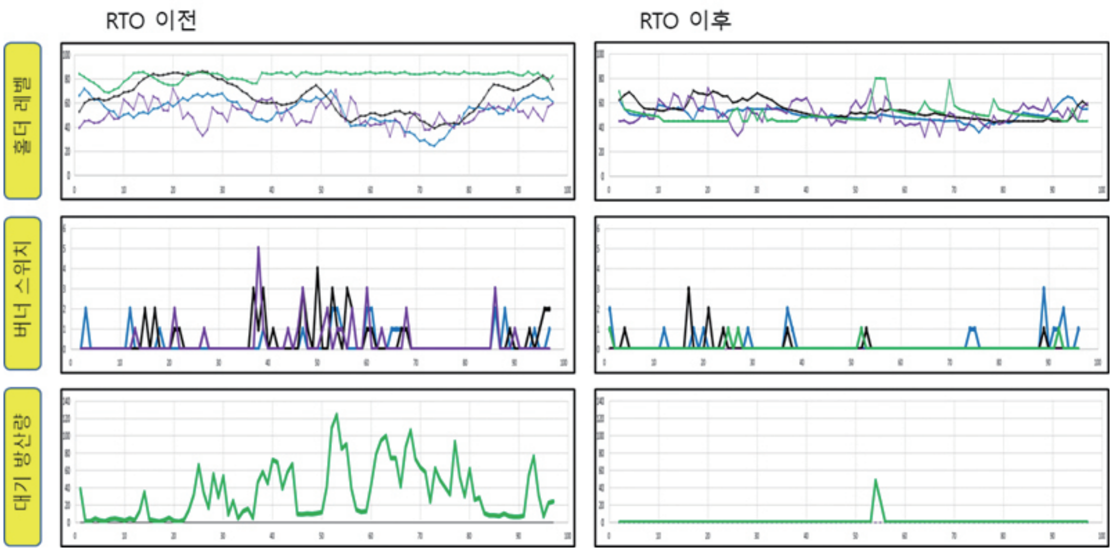

그림 9. 부생가스 시스템의 RTO 적용 전과 후 운전 비교

(4) 원유정제 공정

원유정제 공정은 정유공장에서 가장 대표적인 공정으로 원유(Crude Oil)를 가열해 엘피지, 납사, 등유, 경유, 중유로 분리한다. 주요 설비는 가열로, 증류탑, 그리고 다 수의 열교환기로 구성된다. 원유는 도입 산지 별로 성상이 매우 다양하다. 특히 우리나라는 여러 산지에서 원유를 도입하기 때문에 원료의 성상 변화가 심해서 그때 그때 품질 변화를 가능한 줄여서 고가의 제품을 최대한 많이 생산하는 것이 중요하다.

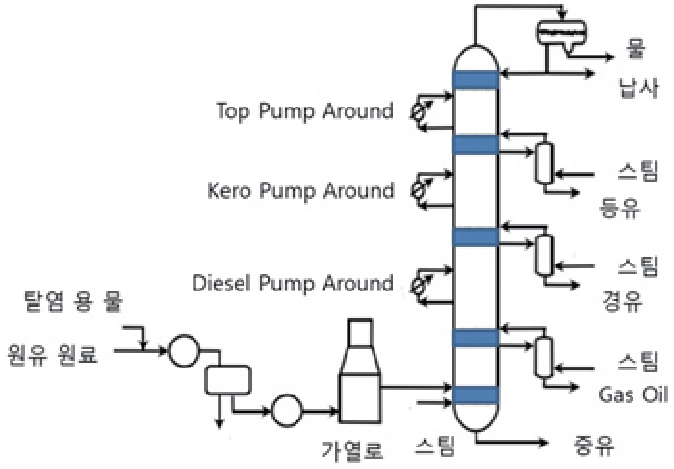

그림 10. 원유정제 공장 구성도

정유공장은 생산 제품 가격이 연간 수 조원으로 규모가 매우 커서 유량계의 미세한 오차도 경제성에 큰 영향을 미치므로 정확한 유량 측정이 매우 중요하다. PTOP-Opt™를 일산 10만 배럴의 정유공장에 적용하였다. PTOP-Opt™의 DR 기능을 통해 유량계 오차를 보정하고, 운전조건 최적화를 실시하였다. 아래 공정도에서 검정색 숫자는 데이터 보정(DR) 전의 유량 측정값을, 붉은색 숫자는 DR 후의 유량 보정값을 나타낸다. 측정값에는 오차가 포함되어 있기 때문에 물질 수지를 만족하지 않지만, DR 후의 보정값은 물질 수지를 만족한다.

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

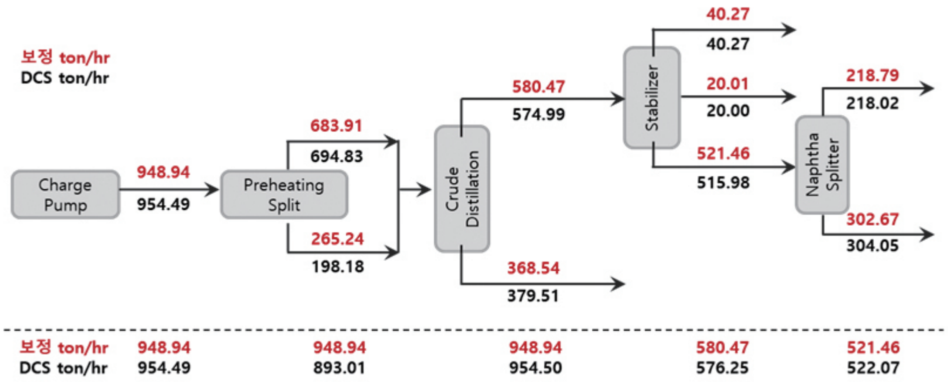

그림 11. 원유공장의 DR 결과: 유량 측정값 대비 DR 후의 유량 보정값

완성된 물질 수지를 이용해 각 설비의 효율 정보를 생성하고 디지털 트윈과 공장을 동기화하였다. 디지털 트윈으로 시뮬레이션을 실시하여 이익을 최대로 하는 운전조건을 도출하였다. 고부가 제품의 수율 증대와 연료를 절감하여, 일산 10배럴의 공장에서는 약 40억원(원유 처리량 기준으로 배럴당 10센트)의 수익이 가능하다.

(5) Acid 가스 황산공장

금속 제련 과정에서 발생하는 Acid 가스는 황산공장에서 황산으로 전환된다. 여러 곳에서 발생하는 Acid가스를 다수의 황산공장에서 처리하는데 있어서, 황산공장은 용량과 원료의 성분 제약이 있기 때문에 이를 고려하여 Acid 가스를 배분해야 한다. Acid 가스를 잘 못 배분하면, 어떤 황산공장은 Acid 가스가 남고, 어떤 황산공장은 Acid 가스가 부족한 상황이 발생한다. 이렇게 되면 LNG를 별도로 공급하거나 Acid 가스 발생의 선행 공장을 가동 정지해야 하므로 손실이 발생한다.

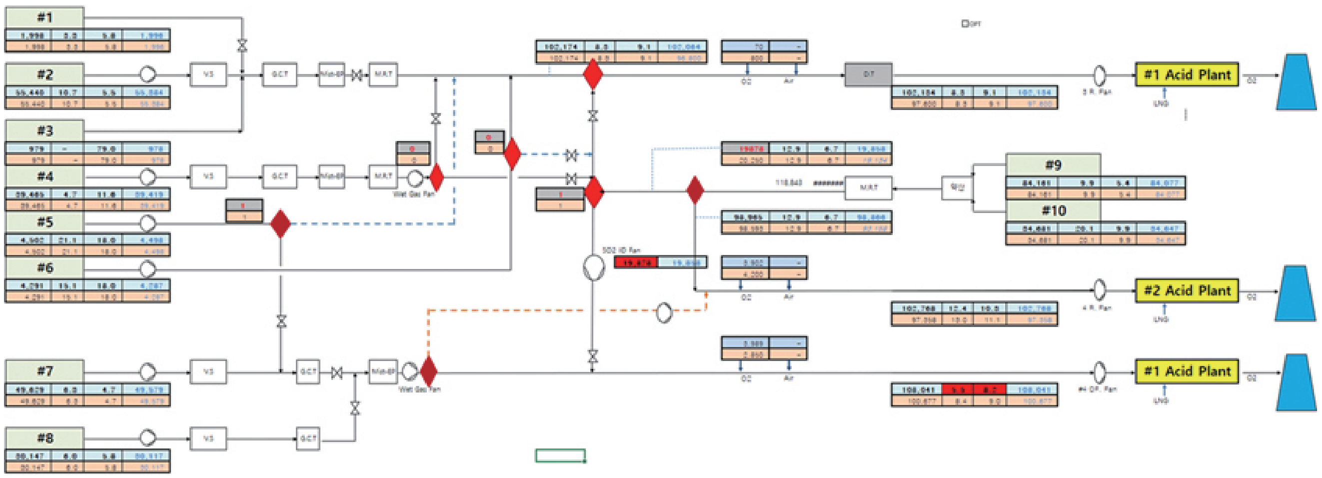

그림 12. Acid 가스 발생 공장 및 황산 생산 공장 배치도

위 그림은 10기의 Acid 가스 생산 공장과 3기의 황산공장의 단순 배치도이다. 최적화 변수는 총 7개의 풍량이며, 밸브를 통해 각 황산공장으로 가스 배분이 결정된다. 제약조건은 아래 표와 같이 각 황산공장의 최대 및 최소 풍량과 Acid 가스 중의 SO_2 %와 O_2 %의 최소 농도이다.

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.

표 2. 황산공장 운전 제약조건

황산공장 운전 제약조건								
#1 황산공장	풍량 Max	100,000	#2 황산공장	풍량 Max	100,000	#3 황산공장	풍량 Max	100,000
	풍량 Min	60,000		풍량 Min	60,000		풍량 Min	70,000
	SO2 Min %	10,0		SO2 Min %	10,0		SO2 Min %	8,00
	O2 Min %	11.0		O2 Min %	12.5		O2 Min %	7.2

담당 엔지니어는 자신의 경험적 지식을 바탕으로 가스를 배분하는데, 최종 안을 수립하기까지 통상 4시간이 소요된다. 소요 시간 만큼 시간 지연으로 손실이 발생하고 있다. 게다가 수작업으로 수립한 분배가 최적이라는 보장도 없었다. PTOP-Opt™을 이용하여 단 5분만에 가스 배분이 결정할 수 있게 되었으며, 최적성도 확인할 수 있었다. 가스 배분 시간이 기존 4시간 이상에서 단 30분으로 줄어듬에 따라 기존에 발생했던 손실을 대부분 줄일 수 있게 되었다.

4. 결론

현재 산업 현장에서는 세계 경제 침체, 고유가 및 탄소 배출 저감 등의 사회 환경적 요인들로 인해 에너지 절감, 생산성 및 효율성 증대를 위한 최적화 솔루션에 높은 관심을 가지고 있다. 최근까지는 소수의 대기업 위주로 RTO 기술이 적용되었지만, 디지털트윈 기술의 발전으로 중견 및 중소기업까지 확대 적용이 예상된다.

종래에는 RTO의 핵심 기술은 소수 기업만이 보유한 특화된 기술이었으나 이제는 널리 개방된 Open Art 기술이다. 본 고에서 소개한 RTO 국산 플랫폼인 PTOP-Opt™는 현장에서 실제로 필요로 하는 설비의 On/Off를 포함한 운전조건의 최적화를 수행한다. 적용 사례에서 살펴본 바와 같이 품질 개선, 에너지 절약, 생산량 증대 효과를 기대할 수 있다. 보통 제품 가격 기준으로 약 1 ~ 3% 이상의 수익성이 개선된다. 디지털 트랜스포메이션의 어플리케이션에서 가장 확실하게 수익을 제공하는 PTOP-Opt™의 도입을 제안한다.

김 아름 _ tingmrk@techdas.co.kr / 이 종현 _ jhlee8654@techdas.co.kr
Tel. 82 (0)2 865 1313 Fax. 82 (0)2 865 1311
서울특별시 금천구 디지털1로 171, 410호 (가산동, 가산 SK V1센터) (우편번호: 08503)

(주)테크다스
www.techdas.co.kr

Copyright 2019 by TechDas. All rights reserved.